

УДК 534.08

## ВИМІРЮВАННЯ ЧАСУ ПРОХОДЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ ІМПУЛЬСІВ В ТВЕРДОТІЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

С.М. ЛІСОВЕЦЬ, Ю.О. СКРИПНИК

Київський національний університет технологій та дизайну

*Запропоновано метод вимірювання часу проходження акустичних імпульсів в твердотільних (в тому числі мікронеоднорідних) середовищах, який дозволяє в результаті застосування оригінального алгоритму виключити з результату вимірювання час проходження акустичних імпульсів через контактний шар між електроакустичним перетворювачем та середовищем, що досліджується, та час затримки електричних імпульсів в електронних схемах формування імпульсів*

Як правило, опис поширення й взаємодії акустичних хвиль у різних твердотільних (в тому числі мікронеоднорідних) середовищах проводиться в рамках класичної 5-и або 9-и константної теорії пружності [1, 2]. Ця теорія визначає нелінійне (відповідно, у квадратичному або кубічному наближенні) рівняння стану однорідних середовищ (тобто залежність компонент тензора пружних напруг  $\sigma_{ij}$  від компонентів тензора деформацій  $\varepsilon_{ij}$ ) [3, 4]. Наприклад, для поздовжніх напруг  $\sigma$  і деформацій  $\varepsilon$  рівняння стану має вигляд

$$\sigma(\varepsilon) = E \left( \varepsilon - \frac{\gamma}{2} \varepsilon^2 + \dots \right), \quad (1)$$

де  $E = \frac{\partial \sigma(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \Big|_{\varepsilon=0}$  – модуль пружності;  $\gamma = -E^{-1} \frac{\partial^2 \sigma(\varepsilon)}{\partial \varepsilon^2} \Big|_{\varepsilon=0}$  – параметр квадратичної нелінійності, причому

завжди  $|\gamma| \ll 1$ .

Однак при розповсюдженні акустичних хвиль в мікронеоднорідних твердотільних середовищах характер нелінійних ефектів є суттєво різним, що можливо застосовувати для їх діагностики та неруйнівного контролю. Рівняння стану таких середовищ відповідають типу та кількості дефектів, які в них утримуються, і можуть бути принципово різними – тобто кожне мікронеоднорідне середовище необхідно досліджувати окремо [5]. Наприклад, наявність тріщин приводить до різних модулів пружності при стисненні або розтяганні, структура матеріалу із зернами призводить до зміни ступеня нелінійності рівняння стану, наявність дислокацій призводить до гістерезисної (тобто неоднозначної) залежності компонент тензора пружних напруг  $\sigma_{ij}$  від компонентів тензора деформацій  $\varepsilon_{ij}$ .

### Об'єкти та методи дослідження

Для однорідних твердотільних середовищ нелінійність обумовлена нелінійною залежністю міжмолекулярних сил взаємодії від зсуву молекул, при цьому параметр квадратичної нелінійності  $\gamma$  досить малий і в більшості випадків не перевищує 10 (виключенням є, наприклад, скло “пірекс”). Однак для мікронеоднорідних твердотільних середовищ, до яких відносяться, здавалося б, зовсім різні середовища – більшість гірських порід, а також деякі метали та конструкційні матеріали – мідь, цинк, свинець, граніт, мармур, вапняк [3, 4] (через їх складну структуру та наявність різних мікродефектів –

тріщин, зерен, дислокацій та ін.), ефективний параметр нелінійності середовищ, як правило, на 3...4 порядки перевищує відповідний параметр однорідних твердотільних середовищ та матеріалів.

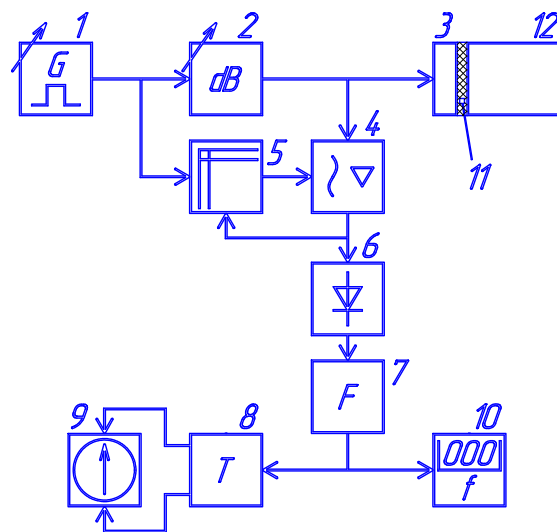
#### **Постановка завдання**

Для чисельного (дуже рідко аналітичного) розв'язання рівнянь станів мікронеоднорідних середовищ необхідно знати швидкість проходження акустичних хвиль через це середовище при такій інтенсивності акустичних хвиль, коли швидкість проходження акустичних хвиль від цієї інтенсивності не залежить (тобто в слабозбурених середовищах). З підвищенням інтенсивності акустичних хвиль починає проявлятися нелінійність середовища розповсюдження, що викликає зміну швидкості розповсюдження цих хвиль. Високоточне визначення швидкості проходження акустичних імпульсів різної інтенсивності дозволяє підвищити роздільну здатність нелінійної акустичної діагностики мікронеоднорідних середовищ, так як нелінійні акустичні властивості таких мікронеоднорідних середовищ є більш чутливими до наявності в них дефектів, ніж лінійні [3,4]. Відомо багато методів визначення швидкості проходження акустичних хвиль: резонансні інтерферометричні, імпульсні, оптичні та деякі інші [6]. Але досить часто з тих або інших причин їх застосувати неможливо (наприклад, через високі похибки або відсутність зручного способу випромінювання та прийому акустичних хвиль), особливо для складних за будовою мікронеоднорідних середовищ. Тому існує нагальна потреба в високоточному визначенні швидкості розповсюдження акустичних хвиль.

#### **Результати та їх обговорення**

Для розв'язання поставленого завдання пропонується пристрій, структурна схема якого наведена на рисунку. Пристрій працює наступним чином. Генератор 1 виробляє імпульси високочастотних електричних коливань, що швидко загасають, які через змінний атенюатор 2 збуджують електроакустичний перетворювач 3 та одночасно потрапляють на вхід підсилювача 4 високої частоти. Амплітуду імпульсів високочастотних електричних коливань необхідно встановити змінним атенюатором 2 такою, щоб встановився лінійний режим зондування середовища, що досліджується, тобто щоб швидкість проходження акустичних імпульсів не залежала від їх амплітуди. При цьому електричні імпульси генератора 1 безпосередньо впливають на блок 5 ЧАРП, який своєю напругою закриває підсилювач 4 високої частоти на заданий час. Електроакустичний перетворювач 3 перетворює електричний зондуючий імпульс в акустичний зондуючий імпульс, який через контактний шар 11 потрапляє у зразок 12. При переході акустичного зондуючого імпульсу в зразок 12 виникає перший акустичний імпульс, що відбився від зовнішньої поверхні зразка, який перетворюється електроакустичним перетворювачем 3 в електричний імпульс. Тривалість запираючого імпульсу, який формується блоком 5 ЧАРП, обирають такою, щоб підсилювач 4 високої частоти був запертий на час дії акустичного зондуючого імпульсу та першого акустичного імпульсу, що відбився від зовнішньої поверхні зразка. Акустичний зондуючий імпульс, що потрапив у зразок 12, проходить цей зразок у вигляді першого акустичного імпульсу, що пройшов зовнішню поверхню зразка, та відбивається від внутрішньої поверхні зразка 12. Перший акустичний імпульс, що відбився від внутрішньої поверхні зразка, проходить зразок 12 в зворотному напрямку та проходить через його зовнішню поверхню. При цьому формуються другий акустичний імпульс, що пройшов зовнішню поверхню зразка та другий акустичний імпульс, що відбився від зовнішньої поверхні зразка. Другий акустичний імпульс, що пройшов зовнішню поверхню зразка, перетворюється в електричний імпульс електроакустичним

перетворювачем 3 та впливає на вхід підсилювача 4 високої частоти, який до моменту приходу другого акустичного імпульсу, що пройшов зовнішню поверхню зразка, уже відкритий. Другий акустичний імпульс, що відбився від зовнішньої поверхні зразка, знову проходить зразок 12, відбивається від внутрішньої поверхні зразка 12 як другий акустичний імпульс, що відбився від внутрішньої поверхні зразка, ще раз проходить зразок 12 та впливає на електроакустичний перетворювач 3 як третій акустичний імпульс, що пройшов зовнішню поверхню зразка. Третій акустичний імпульс, що пройшов зовнішню поверхню зразка, також перетворюється в електричний імпульс електроакустичним перетворювачем 3 та впливає на вхід відкритого підсилювача 4 високої частоти. В результаті на виході підсилювача 4 високої частоти формується періодична послідовність імпульсів з других акустичних імпульсів, що пройшли зовнішню поверхню зразка, та третіх акустичних імпульсів, що пройшли зовнішню поверхню зразка.



**Структурна схема пристрою для вимірювання часу проходження акустичних імпульсів:**

**1** – генератор електричних імпульсів; **2** – змінний атенюатор; **3** – електроакустичний перетворювач; **4** – підсилювач високої частоти; **5** – блок часового автоматичного регулювання підсилення (ЧАРП); **6** – амплітудний детектор; **7** – формувач коротких імпульсів; **8** – тригер; **9** – індикатор; **10** – цифровий частотомір; **11** – контактний шар; **12** – зразок

Електричні імпульси високої частоти детектуються амплітудним детектором 6. З отриманих електричних імпульсів формувачем 7 створюються однополярні короткі імпульси, які впливають на лічильний вхід тригера 8. Поріг спрацювання формувача 7 встановлюється таким чином, щоб наступні акустичні імпульси, які відбиваються від зовнішньої та внутрішньої поверхонь зразка 12 і які мають меншу амплітуду, цим би формувачем 7 пригнічувалися. Короткі однополярні імпульси формувача 7 перемикають тригер 8 з частотою надходження других акустичних імпульсів, що пройшли зовнішню поверхню зразка та третіх акустичних імпульсів, що пройшли зовнішню поверхню зразка.

На прямому та інверсному виходах тригера 8 формуються протяжні прямокутні імпульси, полярність яких протилежна. Тривалість імпульсу однієї полярності визначається часовим інтервалом між приходом другого акустичного імпульсу, що пройшов зовнішню поверхню зразка, та третього акустичного

імпульсу, що пройшов зовнішню поверхню зразка, а тривалість імпульсу іншої полярності – часовим інтервалом між третім акустичним імпульсом, що пройшов зовнішню поверхню зразка та наступним другим акустичним імпульсом, що пройшов зовнішню поверхню зразка. Індикатор 9, який включений між прямим та інверсним виходами тригера 8, реагує на різницю тривалостей перемикаючих інтервалів, що дозволяє їх безпосередньо порівнювати.

При періодичному слідуванні акустичних зондуючих імпульсів перший акустичний імпульс, що відбився від зовнішньої поверхні зразка, з'явиться на вході підсилювача 4 в момент часу

$$t_1 = t_0 + 2\tau, \quad (2)$$

де  $t_0$  – час появи акустичного зондуючого імпульсу на вході електроакустичного перетворювача 3;  $\tau$  – затримка в електроакустичному перетворювачі 3 та контактному шарі 11. В момент часу  $t_1$  підсилювач 4 закритий блоком 5 ЧАРП. Тому перший акустичний імпульс, що відбився від зовнішньої поверхні зразка, з послідовності імпульсів, яка приймається, буде виключений. Другий акустичний імпульс, що пройшов зовнішню поверхню зразка (після відбиття від внутрішньої поверхні зразка 12), з'явиться на вході підсилювача 4 в момент часу

$$t_2 = t_1 + 2T = t_0 + 2\tau + 2T, \quad (3)$$

де  $T$  – час проходження акустичними імпульсами відстані між зовнішньою та внутрішньою поверхнями зразка 12. На момент часу  $t_2$  підсилювач 4 вже відкритий, тому підсилений електричний імпульс з'явиться на його виході. Третій акустичний імпульс, що пройшов зовнішню поверхню зразка, з'явиться на вході підсилювача 4 в момент часу

$$t_3 = t_2 + 2T = t_0 + 2\tau + 4T \quad (4)$$

і також буде підсилений. Наступні відбиті імпульси з меншими амплітудами будуть з'являтися через часові інтервали, які кратні  $2T$ . При впливі наступного акустичного зондуючого імпульсу знову з'являться наступні перший акустичний імпульс, що відбився від зовнішньої поверхні зразка, другий акустичний імпульс що пройшов зовнішню поверхню зразка та третій акустичний імпульс, що пройшов зовнішню поверхню зразка. Наступний перший акустичний імпульс, що відбився від зовнішньої поверхні зразка, з'явиться від електричного зондуючого імпульсу в момент часу

$$t_4 = t_0 + \frac{1}{f}, \quad (5)$$

де  $f$  – початкова частота слідування акустичних зондуючих імпульсів. Цей імпульс буде виключений блоком 5 ЧАРП, який стимульований наступним акустичним зондуючим імпульсом. Наступний другий акустичний імпульс, що пройшов зовнішню поверхню зразка, з'явиться на вході вже відкритого підсилювача 4 в момент часу

$$t_5 = t_4 + 2T = t_0 + \frac{1}{f} + 2T \quad (6)$$

та буде підсилений. Наступний третій акустичний імпульс, що пройшов зовнішню поверхню зразка, також буде підсилений та з'явиться в момент часу

$$t_6 = t_5 + 2T = t_0 + \frac{1}{f} + 4T. \quad (7)$$

Таким чином, на тригер 8 будуть впливати перемикаючі імпульси в моменти часу  $t_2$  і  $t_3$  з інтервалом

$$\Delta\tau_1 = t_3 - t_2 = (t_0 + 2\tau + 4T) - (t_0 + 2\tau + 2T) = 2T \quad (8)$$

та паузою

$$\Delta\tau_2 = \frac{1}{f} - \Delta\tau_1 = \frac{1}{f} - 2T. \quad (9)$$

Тобто на прямому та інверсному виходах тригера 8 будуть формуватися електричні різнополярні імпульси з тривалостями  $\Delta\tau_1$  та  $\Delta\tau_2$ . Індикатор 9 зафіксує нерівність середніх значень струмів двох імпульсів зсувом вказівника з нульової відмітки. Далі змінюють частоту слідування імпульсів генератора 1 до значення  $f^*$ , при якому індикатор встановиться на нульову відмітку. При цьому необхідно врахувати, що при зближенні інтервалів  $\Delta\tau_1$  та  $\Delta\tau_2$  третій акустичний імпульс, що пройшов зовнішню поверхню зразка, за часом починає співпадати з наступним першим акустичним імпульсом, що відбився від зовнішньої поверхні зразка. В момент їх співпадання ( $\Delta\tau_1 = \Delta\tau_2$ ) підсилення третього акустичного імпульсу, що пройшов зовнішню поверхню зразка, підсилювачем 4 припиняється, так як він в цей момент закритий блоком 5 ЧАРП. В результаті на тригер 8 починають впливати тільки другі акустичні імпульси, що пройшли зовнішню поверхню зразка, які рівномірно слідуєть із встановленою частотою  $f^*$  слідування акустичних зондуючих імпульсів. При інших значеннях частоти  $f^{**}$  слідування акустичних зондуючих імпульсів, коли  $f^{**} > f^*$  або  $f^{**} < f^*$ , на тригер 8 потрапляє нерівномірна послідовність імпульсів, як складається як із других акустичних імпульсів, що пройшли зовнішню поверхню зразка, так і з третіх акустичних імпульсів, що пройшли зовнішню поверхню зразка, з нерівними інтервалами ( $\Delta\tau_1 \neq \Delta\tau_2$ ). Показання індикатора 9 встановлюється пропорційним різниці інтервалів  $\Delta\tau_1$  та  $\Delta\tau_2$ , що порівнюються:

$$U = S(\Delta\tau_1 - \Delta\tau_2), \quad (10)$$

де  $S$  – крутизна перетворення інтервалів часу в електричну напругу (виражена в  $\text{В}/\text{нс}$ ). При рівності інтервалів  $\Delta\tau_1$  та  $\Delta\tau_2$ , що порівнюються, і з урахуванням рівнянь (8) та (9) маємо:

$$t_3 - t_2 = \frac{1}{f^*} - 2T, \quad (11)$$

де  $f^*$  – частота слідування акустичних зондуючих імпульсів, яка встановлена при нульовому показанні індикатора 9. Підставляючи в формулу (11) значення  $t_2$  з формули (3) та значення  $t_3$  з формули (4), отримаємо:

$$\frac{1}{f^*} = (t_0 + 2\tau + 4T) - (t_0 + 2\tau + 2T) + 2T = 4T. \quad (12)$$

З формули (12) зрозуміло, що частота акустичних зондуючих імпульсів, які виробляє генератор 1, встановлюється кратною часу проходження імпульсів через зразок 12:

$$\frac{1}{f^*} = \frac{1}{4T}. \quad (13)$$

Частота слідування других акустичних імпульсів, що пройшли зовнішню поверхню зразка, співпадає з частотою слідування акустичних зондуючих імпульсів. Тому час проходження акустичних зондуючих імпульсів через зразок 12 можна оцінити по формулі

$$T = \frac{1}{4f_0}, \quad (14)$$

де  $f_0$  – частота слідування других акустичних імпульсів від зовнішньої поверхні зразка. Частоту слідування  $f_0$  других акустичних імпульсів, що пройшли зовнішню поверхню зразка, вимірюють цифровим частотоміром 10, на який потрапляють однополярні короткі імпульси, що створюються формувачем 7. Вплив всіх наступних відбитих імпульсів пригнічується, так як вони впливають на підсилювач 4 в такі моменти часу, коли він заблокований роботою 5 ЧАПР через співпадання в часі третіх акустичних імпульсів, що пройшли зовнішню поверхню зразка, з наступними першими акустичними імпульсами, що відбилися від зовнішньої поверхні зразка. Таким чином, по виміряному значенню частоти  $f_0$  других акустичних імпульсів, що пройшли зовнішню поверхню зразка, визначають час проходження акустичних імпульсів через зразок матеріалу або середовища, що досліджується, незалежно від неминучих затримок в електроакустичному перетворювачі, контактному шарі та електричних ланках вимірювальної схеми. Так як перемикаючі імпульси формуються тільки з відбитих імпульсів, то зменшується вплив спотворень їх форми на результат вимірювання. Відповідно до формули (14), якщо товщина зразка 12 становить  $L$ , то швидкість проходження акустичних імпульсів через зразок становитиме

$$c = \frac{L}{T} = 4f_0L. \quad (15)$$

### Висновки

Запропонований метод вимірювання часу проходження акустичних імпульсів дозволяє виключити з результату вимірювання дві основні складові: час проходження акустичних імпульсів через контактний шар між електроакустичним перетворювачем 3 та зразком 12, що досліджується, та час затримки електричних імпульсів в електроакустичному перетворювачі 3. За необхідності, змінюючи за допомогою змінного атенюатора 2 амплітуду акустичних зондуючих імпульсів, що потрапляють у зразок 12, можна фіксувати зміну швидкості акустичних імпульсів  $\Delta c$ , яка залежить від амплітуди цих імпульсів (явище амплітудно-залежного внутрішнього тертя).

### ЛІТЕРАТУРА

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
2. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. – М.: Наука, 1966. – 520 с.

3. Назаров В.Е., Радостин А.В., Островский Л.А., Соустова И.А. Волновые процессы в средах с гистерезисной нелинейностью. Часть I // Акустический журнал.— 2003. — т. 49. — №3. — с. 405–415.
4. Назаров В.Е., Радостин А.В., Островский Л.А., Соустова И.А. Волновые процессы в средах с гистерезисной нелинейностью. Часть II // Акустический журнал. — 2003. — т. 49.— № 4. — с. 529–534.
5. Брандон Д., Каплан В. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля.— М.: Техносфера, 2004.— 384 с.
6. Луцик Я., Буняк Л., Стадник Б. Застосування ультразвукових сенсорів.— Львів, СП, 1998. — 232 с.

Надійшла 15.02.2010

УДК 621.5

## КООРДИНУВАННЯ ТІЛ У ПРОЦЕСІ ЇХ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ

Т.Г. ЛУКАНІНА

Київський національний університет технологій та дизайну

*Розглянуто можливість координування тіл у процесі їх переміщення по пневмотранспортуючому пристрою за допомогою напрямленої дії повітряних струменів на бокові поверхні тіла. Наведено деякі теоретичні аспекти цієї проблеми*

Процес координування та орієнтування тіл під час їх переміщення передбачає стабілізацію по двом параметрам – поперечному зміщенню відносно осі основного поступального руху та кутовому повороту. Найчастіше така стабілізація відбувається за допомогою пристроїв, в яких здійснюється безпосередній механічний контакт між тілом, що транспортується, та напрямляючими органами пристроїв.

Зрозуміло, що багаторазове зіткнення виробів, які мають підвищену адгезійність та легко деформуються, з жорсткими напрямними частинами пристроїв не може не відбитися на товарному вигляді цих виробів.

Таких недоліків позбавлений спосіб орієнтування подібних виробів за допомогою направленного впливу повітряних струменів.

### **Постановка завдання**

Мета досліджень полягає у визначенні основних параметрів координування тіл у процесі їх переміщення по пневмотранспортуючому пристрою. Процес координування та транспортування тіл відбувається за допомогою напрямленої дії повітряних струменів.

### **Результати та їх обговорення**

Тіла з підвищеною ламкістю та адгезійністю доцільно транспортувати та орієнтувати, виключаючи їх контакт з транспортуючими поверхнями.

На рис. 1 показані деякі можливі схеми реалізації такого способу.